

文章编号:1673-8411 (2018) 02-0033-08

一次冰雹天气的数值模拟及地形敏感性试验

张凌云, 刘 蕾, 王 艺, 李宜爽

(柳州市气象局, 广西 柳州 545001)

摘 要: 运用 WRF 中尺度模式对 2012 年 4 月 12 日柳州市出现的一次冰雹强对流天气过程进行了高分辨率数值模拟,较好地再现了冰雹天气发生的热力和动力机制,在此基础上对柳州市北部山脉作降低和升高处理,运用 WRF 中尺度模式进行了地形敏感性试验,结果表明:(1)此次冰雹天气过程发生在典型的干下湿不稳定大气层结中;(2)强对流发生需要较长的能量积累时间,但强对流爆发后能量释放迅速且时间短暂;(3)强对流发生前上升运动和正涡度较弱,且当中层有“干侵入”时会出现较弱的下沉运动,但在强对流爆发时上升运动瞬间突增,正涡度迅速增加,强上升运动和强涡度柱到达对流层上部,并出现强的垂直风切变;(4)地形改变对深厚冷空气的影响不大,地形降低使山脉南部急流强度加大,地形升高使山脉南部急流强度减弱,急流核南落,地形升高也使得动力条件明显增强,对强对流的发生更有利。

关键词: 干侵入;强垂直风切变;地形影响

中图分类号: P458.1*21.2

文献标识码: A

A numerical simulation of a hail weather and a topographic sensitivity test

Zhang Lingyun, Liu Lei, Wang Yi, Li Yishuang

(Liuzhou Meteorological Bureau, Liuzhou Guangxi 545001)

Abstract: Using WRF scaling method, a strong convective hail process in Liuzhou City, on April 12, 2012, was simulated with a high resolution, the thermal and dynamic mechanism of hail weather was reproduced accurately. On this basis, a terrain sensitivity test was conducted by using WRF scale model, in which the height of Liuzhou northern mountains was decreased and increased. The terrain sensitivity test results showed that: (1) the hail weather occurred in a typical upper dry, wet, and unstable atmospheric junction; (2) the strong convection occurred after a long period of energy accumulation, but the energy release was fast and short after that; (3) before the strong convection, there was an upward motion and weak positive vorticity, and a weak downward motion occurred when there was a dry intrusion in the middle; at the outbreak of the strong convection, ascending motion suddenly increased, along with a rapid increase of positive vorticity, the strong upward motion and strong vorticity column reached the upper troposphere and a strong vertical wind shear emerged; (4) the changes of terrain had little effect on the deep cold air; lowering the terrain increased the jet intensity of southern mountain, raising the terrain weakened it and led the jet travel southward, raising the terrain also significantly enhanced the dynamic conditions, making strong convections more likely to occur.

Keywords: dry intrusion; strong vertical wind shear; topographic influence

收稿日期:2018-03-12

作者简介:张凌云(1975-),女,广西融安人,高级工程师,主要从事天气预报预警工作. E-mail:364548737@qq.com。

前言

强对流天气是我国一类比较常见的气象灾害,是由强对流系统引发的剧烈天气现象,通常发生在特殊的天气背景下。近年来,随着多种新型遥感观测系统开始建立和完善,特别是分辨率较好的雷达、卫星资料的出现,为分析和监测强对流天气提供了更为详尽的资料和可靠的手段,国内外许多学者^[1-5]利用这些高分辨率资料,针对不同地区的强对流天气开展了大量研究。就冰雹而言,许焕斌等^[6]利用冰雹云模式和冰雹运行增长模式,经过一系列系统研究,提出了新的“穴道”动力与微物理相往耦合的概念模型,探究了冰雹形成和增长致灾的机理。康凤琴等^[7]利用三维冰雹云分档模式,模拟研究了各类冰雹形成和增长的过程,探究青藏高原地区冰雹形成的机制。华南地区是冰雹高发区,许多学者也对出现在广东、广西地区的一些冰雹天气的形成机制、环流背景、雷达特征^[8-18]等进行了比较深入的分析,这些成果为研究和了解冰雹天气的形成和发生机制提供了很好的理论依据。

2012年4月12日傍晚到夜间,柳州市遭受了一次冰雹灾害天气袭击,冰雹主要出现在市境北部的三江、融安、融水县,冰雹最大直径20mm,降雹时间持续20min左右,局地伴有6~7级雷雨大风和短

历时强降水,灾情损失较严重。本文将运用数值模拟方法,深入探讨此次强对流过程的发生机制及地形对强对流的影响,为柳州强对流天气的短期预报提供一些理论支撑。

1 环流背景

4月12日08时(图1a),200hPa桂北处于 $\geq 40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高空偏西南急流中,500hPa南支槽位于云南中部,广西位于南支槽前暖湿气流中,而温度槽则已到达桂西,超前于高度槽,850hPa广西处于西南急流左侧比湿大于 $12\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的湿区中,24h变温大于 0°C ,有明显的暖平流,地面广西受强大的暖低压控制,冷锋在河套以南至长江以北地区。到了20时(图1b),桂北-桂中仍位于 $\geq 40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高空西风急流中,500hPa南支槽中段已东移到河池,温度槽则移到了湖南东南部,此时,桂北已开始有干冷平流侵入,850hPa切变线和地面冷锋刚刚到达黔桂交界,桂北仍处于低空西南急流左侧高温高湿区。中层干冷平流的侵入造成了上层干冷、下层暖湿的不稳定层结,20时以后,500hPa南支槽继续东移引导850hPa切变线和地面冷空气逐渐侵入桂北,触发了强烈的中尺度对流上升运动,最终导致了柳州“2012·4·12”强对流天气的暴发。

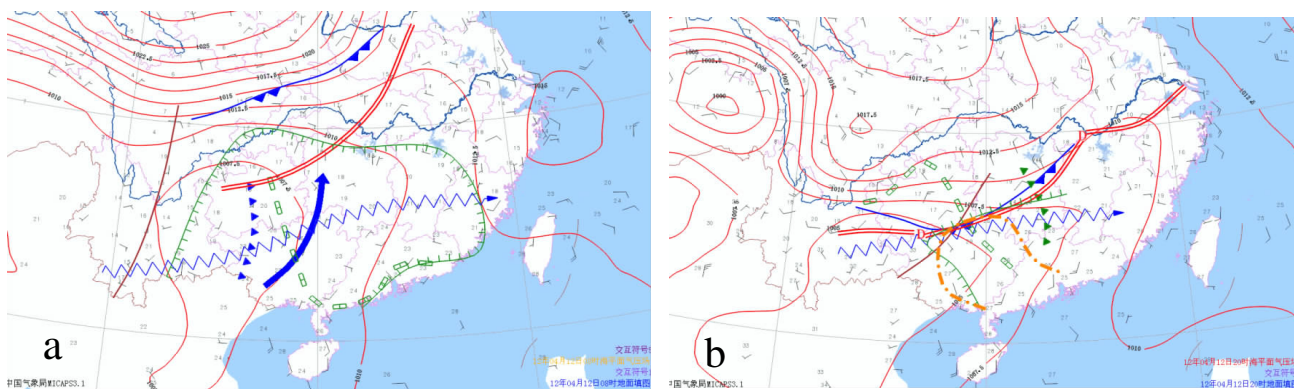


图1 2012年4月12日08时(a)和20时(b)环境场分析

2 数值模拟方法

数值模拟所用模式是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构中心共同开发的非静力中尺度模式WRFV3.2.1版本。利用2012年4月12日00时-2012年4月13日12时的每6h一次的NCEP全球客观分析资料(水平分辨为 $1^\circ\times 1^\circ$)积分36小时对

此次强对流过程进行模拟。控制试验方案采用三重嵌套网格,水平分辨率分别为D01:45km \times 45km, D02:15km \times 15km, D03:5km \times 5km,中心均定于 110°E 、 25°N (图2),垂直分28层,模式顶为50hPa。D01、D02、D03分别用精度为10m、5m、2m(即大约为18km、9km、3.6km)的地形资料。模式的参数化方案设计具体参照表1。

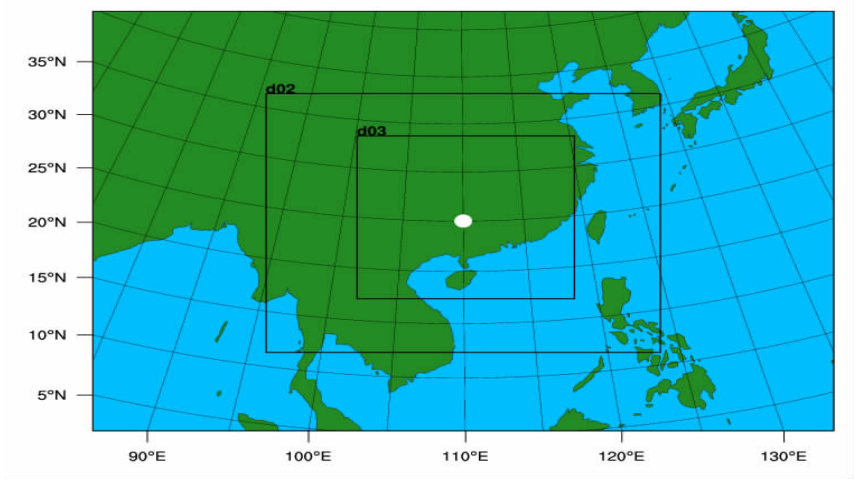


图 2 模式模拟区域(D02 为第二重网格,D03 为第三重网格)

表 1 模式参数化方案设计

	分辨率	微物理过程	积云参数化	陆面过程	边界层方案	长波辐射	短波辐射
区域 1	45km	WSM 3-class simple ice scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Noah	YSU	RRTM	Dudhia
区域 2	15km	WSM 3-class simple ice scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Noah	YSU	RRTM	Dudhia
区域 3	5km	Lin et al. scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Noah	YSU	RRTM	Dudhia

3 数值模拟结果对比检验

3.1 降雨量的检验

从过程雨量实况与模拟结果对比图(图 3,见彩页)可以看出,模拟出的雨带范围、形状、雨量极值中心和位置跟实况均较一致,雨量极值中心位于融水附近,只是中心强度值模拟结果较实况略偏大,但仍在暴雨量级范围内。因此,总体而言,过程雨量的模拟结果与实况吻合度较好。

3.2 环流形势检验

图 4 给出的是 4 月 12 日 20 时 850hPa 流场实况(a)和数值模拟结果(b)对比,可以看出,模拟出的切变线位置、走向跟实况基本一致。同时对比分析了模拟的 500hPa、700hPa、以及 10m 流场的形势演变图与实况图(图略),发现 500hPa 南支槽的位置与移速、700hPa 低涡切变线的位置变化、以及近地面辐合线的位置与南压的时间、冷空气的强度和路径,模拟结果与实况也基本一致,说明模拟方案较合理,模拟结果较成功。

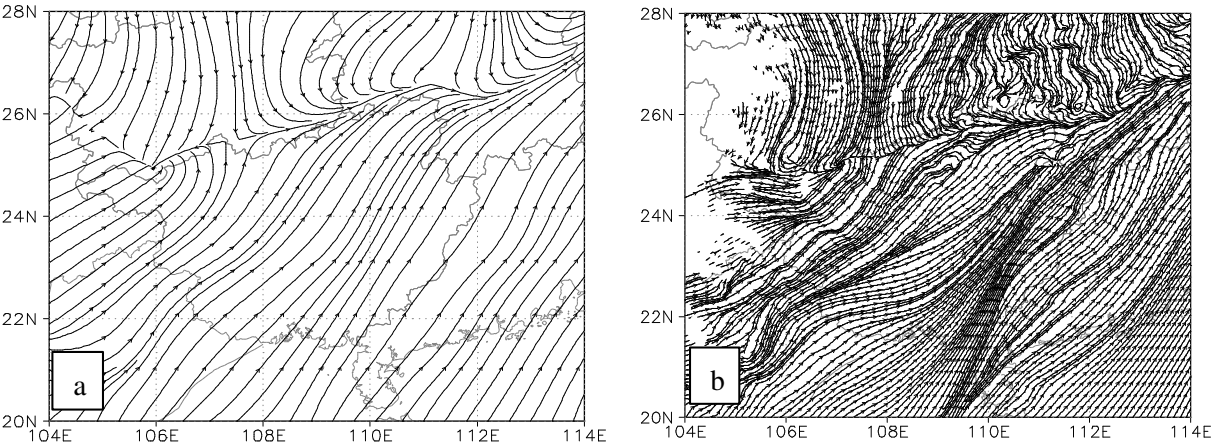


图 4 2012 年 4 月 12 日 20 时 850hPa 流场实况(a)与数值模拟结果(b)对比

4 数值模拟结果诊断分析

4.1 充足的水汽条件

低空急流的维持为强对流天气的发生提供水汽供应。从模拟出的 850hPa 风场演变来看,12 日 08

时(图 5a)至 20 时(图 5b),广西中东部一直维持较强的西南风低空急流,为强对流天气的发生提供了充足的水汽条件,直至 22 时强对流天气结束以后,柳州上空的西南风低空急流才逐渐南压。

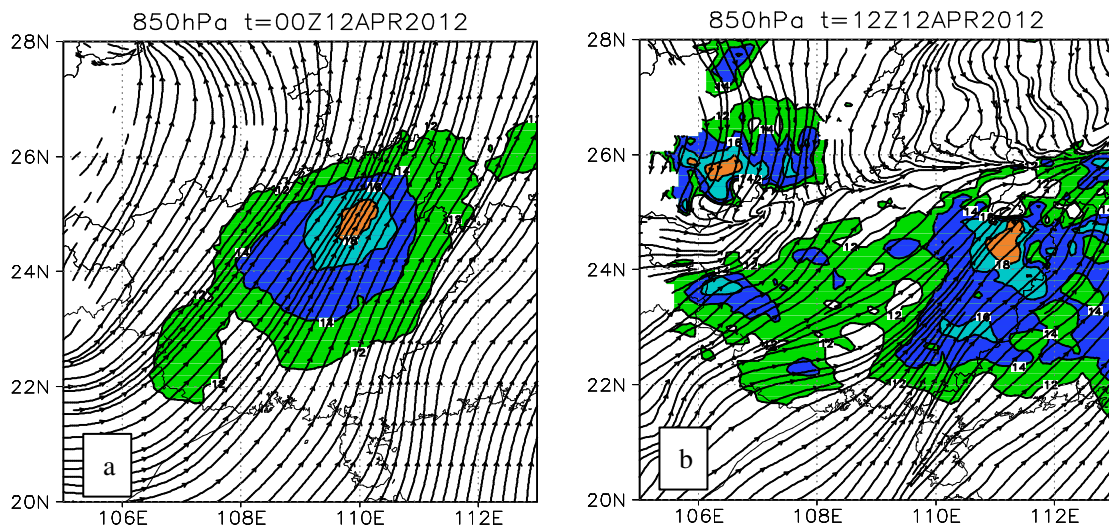


图 5 2012 年 4 月 12 日 08 时(a)和 20 时(b)850hpa 模拟流场图
(阴影部分为风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域)

4.2 较大的对流不稳定能量

从模拟 cape 值的演变情况来看(图 6),12 日 08 时以后,柳州上空的不稳定能量开始逐渐积累,14 时左右达到最大值,接近 $2100\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,其后不稳定能量有所释放,但释放速度缓慢,直到 19 时以后,高低空急流的耦合和冷空气的触发,强对流天气爆发,不稳定能量开始迅速释放,至 20 时 cape 值迅速降到 $100\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 左右,23 时以后 cape 值降到 0 附近,与强对流天气的发生和结束时间对应较好。

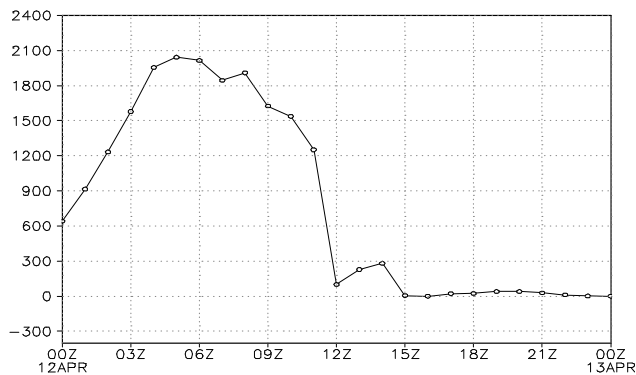


图 6 2012 年 4 月 12 日 08 时至 13 日 08 时模拟融水站 cape 值时间剖面图(单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)

4.3 上干下湿的不稳定层结

从模拟的相对湿度演变(图 7,见彩页)来看,在

强对流天气发生前,柳州上空维持上干下湿的层结分布,12 日 14 前,干冷层基本维持在 500hPa 以上,500hPa 以下为暖湿层。14 时以后,干冷层逐渐向 500hPa 以下扩展,同时低层的暖湿气流也逐渐增强,说明柳州上空中低层逐渐有干冷平流的侵入,17 时左右侵入到 700hPa 左右,低层的暖湿气流也发展到最强盛,大气层结不稳定性也达到最强烈。20 时前后,强对流触发,由于上升运动的发展,上干下湿的不稳定层结被破坏,低层的暖湿气流被强迫抬升,湿层瞬间增厚。说明在强对流天气发生时段,低层的暖湿气流强盛,中高层则有干冷空气侵入,中层较强的干冷空气在锋区上波动,通过斜压扰动产生垂直环流,为强对流的触发提供动力条件。

4.4 强的垂直风切变

图 8 是模拟的垂直速度(w)演变图,正值代表上升运动,负值代表下沉运动。由图可见,在强对流天气发生前的能量积聚阶段,12 日 17 时以前,对流层中低层以上升运动为主,有利于不稳定能量的积聚,特别是在 14 时前后,上升运动明显增强,与 cape 值在 14 时左右达到最高峰相对应。17 时以后,对流层中下层(300hPa 以下)开始出现下沉运动,说明中层已经开始有干冷平流侵入,与湿度层结变化有较好的对应。20 时前后,随着低层切变线和地面

冷空气的南压,垂直运动方向发生逆转,整个对流层都转为上升运动,上升运动在 300hpa 附近达到最大,超过了 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,上下层出现了强的垂直风切变,强的垂直风切变触发了强对流的爆发。23 时,中低层转为明显的下沉运动,强对流天气结束。

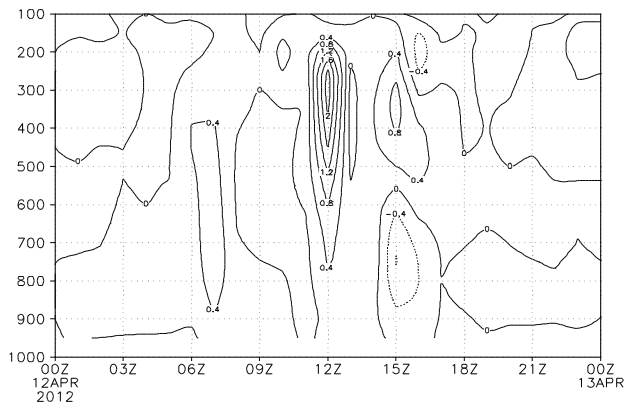


图 8 2012 年 4 月 12 日 08 时至 13 日 08 时融水站垂直速度(w)时间剖面图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

4.5 较好的动力抬升条件

图 9 为模拟的区域平均涡度($109^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}, 24^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$) 时间剖面图。由图可见,12 日 14 时前,柳州上空对流层低层为正涡度,对流层中上层为负涡度,从 14 时开始,正涡度区扩展到对流层上部,强涡度柱伸展到 250hpa 左右,500hPa~400hPa 涡度中心达到 $5\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 以上,表明 12 日 14 时以后柳州地区的上升运动明显增强。17 时开始到 20 时前后,对流层上部的负涡度区向下侵入,表明对流层中上部出现下沉运动,与 17 时以后对流层中层的干侵入相对应。20 时左右,正涡度区明显增强,强涡度一直伸展到 150hpa 以上,900hpa~500hpa、和 200hpa 附近分别出现了 $6\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 和 $4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的强涡度中心,表明 20 时上升运动发展最强烈阶段,与强对流爆发的时间对应较好。

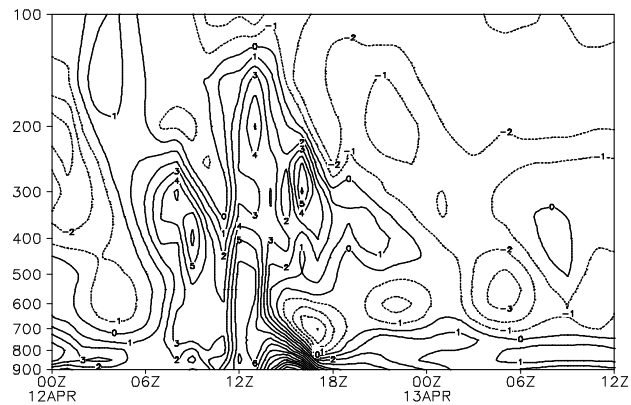


图 9 模拟区域平均涡度($109^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}, 24^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$)的时间剖面图(单位: 10^{-5}s^{-1})

5 地形敏感性试验

5.1 敏感性试验设计方案

为了研究此次强对流天气过程中柳州西北部山脉的作用,本文对柳州西北部的山脉高度进行了敏感性试验(TER1、TER2),试验范围为: $24.9^{\circ}\text{N}\sim 25.6^{\circ}\text{N}, 108.3^{\circ}\text{E}\sim 109.3^{\circ}\text{E}$ (图 10)。TER 为原地形控制试验,TER1 试验是将地形高度降至 300m,TER2 是将地形按比例增高到原地形的 2 倍(图 11,见彩页)。然后将 TER1、TER2 和控制试验(CTRL)模拟结果进行对比分析,从而探讨柳州西北部山脉对柳州强对流天气的影响。

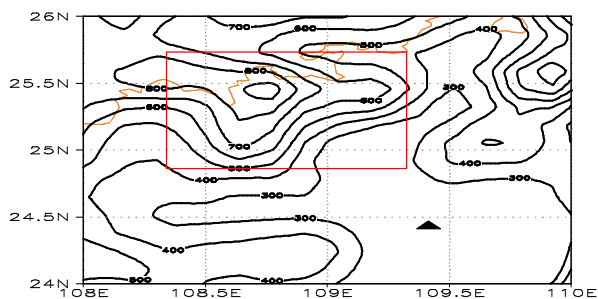


图 10 柳州北部地形高度图(单位:m)“▲”为柳州市政府所在地(图中矩形所示区域为地形敏感性试验中地形改变的区域)

5.2 敏感性试验结果分析

5.2.1 地形对降水的影响

将敏感性试验与控制试验的过程降雨量结果进行对比(图 12,见彩页),可以看出,地形改变后雨带的分布形状及范围变化不大,降水中心强度也没有明显变化,只是强中心的形状和位置出现了一些较小的改变。将地形降低至 300 米后(图 12b),山脉东南侧降水量略有减小;而将地形高度增加 1 倍后(图 12c),强降水中心略有南落,且山脉东南侧降水有较所增强,在山脉东侧还出现了一个次强中心。从动力气象学的角度分析,当西北部山脉变成“平台”后,气流可以平坦地流过山脉,没有地形的强迫和气流的堆积,因此山脉附近降水强度应变小;而当地形高度升高后,西南暖湿气流经过水汽通道被输送到其迎风坡处,受到地形的阻挡,使得水汽和热量堆积,并在地形强迫作用下产生迎风坡降水,降水量级应增大。对于此次强对流天气过程而言,强天气以冰雹和雷雨大风为主,过程降水量级不大,只有很小的局部地方出现了暴雨,因此,地形对降水的影响不十分显著,敏感性试验也恰好说明了这一点。

5.2.2 地形对水汽条件的影响

诊断分析结果表明,此次强对流天气酝酿和爆发期间,广西上空中层一直维持东北-西南走向的急流带,柳州处于这支急流带的左侧,低空急流一方面为强对流天气输送水汽和能量,另一方面其与高空急流的耦合也是此次强对流的重要触发机制。图 13 给出的是 12 日 20 时 850hPa 流场与全风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 叠加图,CTRL 试验(图 13a)结果表明,广西上空风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南急流带涵盖了除桂西北以外的大部地区,最风速中心达 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,在山脉的西面有一个低涡。与控制试验相比,地形降低后(图 13b),急流的总体影响范围变化不大,但在山脉南部,也就是柳州西北部,风速有一块明显增大, $24^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间出现了 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速区,最大风速中

心 $\geq 14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 急流轴的影响范围也略向北扩展,这说明柳州西北部山脉降低至“平台”后,强盛的西南气流可以越过山脉向北推进,地形抬升作用减弱。而由于低涡位于山脉西部,因此,地形降低对低涡位置和强度影响不大。与控制试验相比,地形升高后(图 13c),急流的强度有所减弱,表现在 $\geq 18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速中心明显缩小,山脉南部的急流影响范围稍有南落,山脉西侧的低涡也减弱消失,这表明地形升高以后,由于受到地形的阻挡,其南侧的偏南风风速减小,西南暖湿气流被山脉隔断,因此通过急流输送的水汽和能量只能被输送到其迎风坡,在此水汽和热量堆积,地形强迫抬升作用增强,对强对流的触发更有利。对比图 a、b、c 还可以看出,地形对山脉北部气流的影响不大。

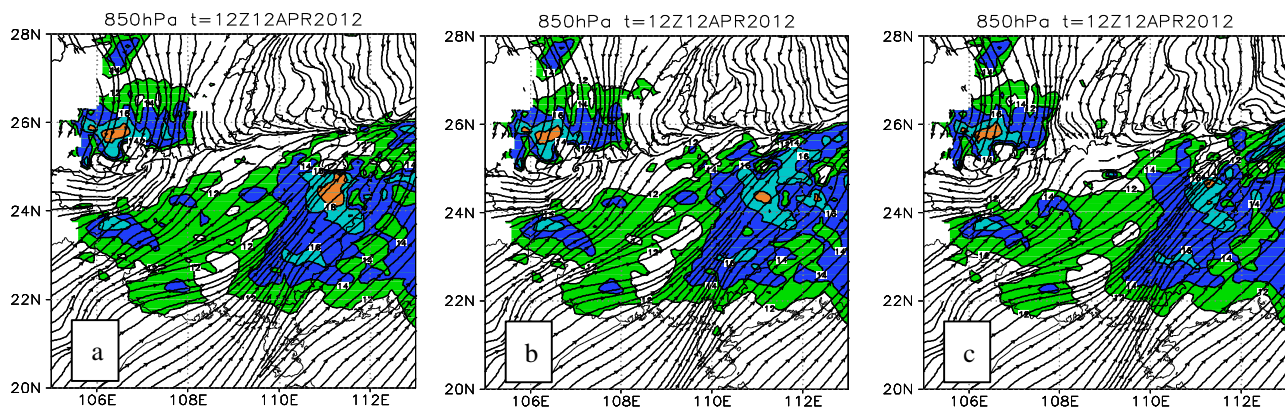


图 13 2012 年 4 月 12 日 20 时 850hPa 流场与全风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 叠加图(阴影)
CTRL 试验(a),TER1 试验(b),TER2 试验(c)

5.2.3 地形对冷空气路径的影响

图 14 给出的是 12 日 20 时广西上空 10m 高度的流场图。对比控制试验和敏感性试验结果可以看出,地形改变前后,近地层辐合线的走向、位置、形态都没有明显的改变,这与前文分析的“地形对山脉北

部气流的影响不大”相吻合。诊断分析表明,此次强对流天气过程冷空气较深厚,到达 500hpa 以上,而在此次敏感性试验中,地形抬高至两倍后,柳州西北部山脉的高度也只有 2000m 左右,低于冷空气的厚度,因此地形改变对深厚的冷空气路径影响不大。

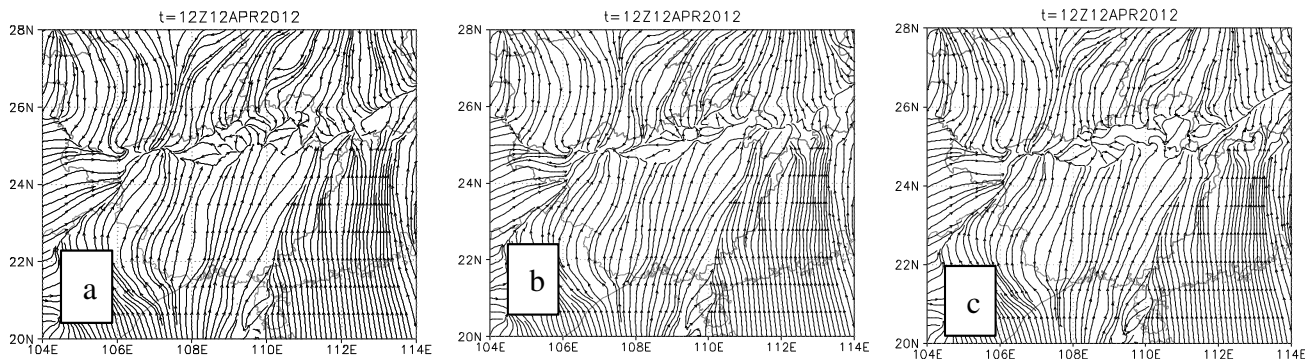


图 14 2012 年 4 月 12 日 20 时 10m 流场图
CTRL 试验(a),TER1 试验(b),TER2 试验(c)

5.2.4 地形对动力条件的影响

图 15a、15b、图 15c 分别为 TER 试验、TER1 试验和 TER2 试验的区域平均涡度 ($109^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}, 24^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$) 时间剖面图。对比图 15b 和图 15a 可以看出, 当地形削为“平台”以后 (图 15b), 强涡度柱出现的时间、伸展高度变化不大, 但正涡度中心的强度稍有增强, 正涡度中心值为 $6\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 变为 $7\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, 正涡度中心高度略有增高, 由 900hpa~hpa500hpa 变为 700hpa~hpa400hpa 之间。由前文分析可知, 此次强对流天气过程冷空气较深厚, 地形变化对冷空气影响不大, 但地形对西南急流影响较明显, 因此地形高

度降低后, 由于山脉南部偏南急流有所增强, 与南下的冷空气辐合也有所增强, 动力条件反而比地形改变前略好。对比图 15c 和图 15a 可以看出, 地形升高以后, 强涡度柱出现的时间和伸展高度变化也不大, 但中低层正涡度中心有了明显增强, 低层涡度大值区由 $6\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 增加到 $9\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, 且在 900hpa~800hpa 之间还出现了中心值为 $8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的次涡度中心, 表明地形升高以后, 暖湿气流被山脉的强迫抬升作用增强, 辐合上升运动更强烈, 形成的正涡度中心也更大, 因此对强对流的发生更有利。

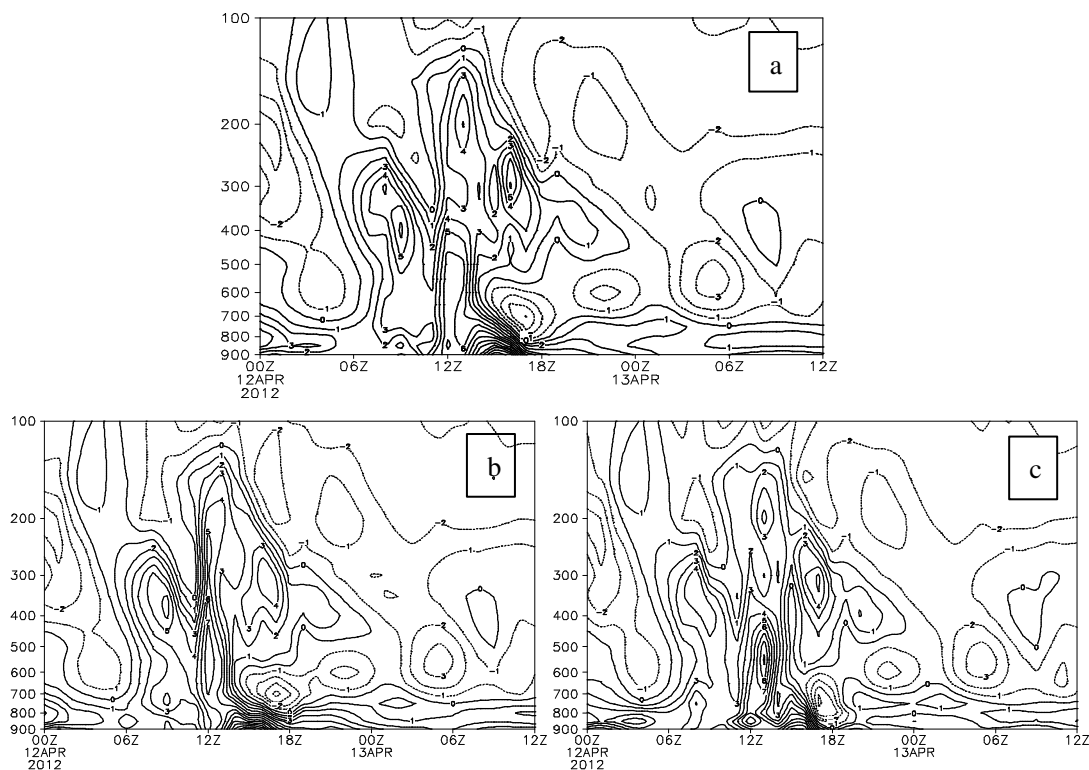


图 15 2012 年 4 月 12 日 20 时区域平均涡度 ($109^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}, 24^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$) 的时间剖面图 (单位: 10^{-5}s^{-1}), TER 试验 (a) TER1 试验 (b), TER2 试验 (c)

6 结论与讨论

(1) 数模结果和诊断分析表明, 此次冰雹强对流天气发生在典型的上层干冷下层暖湿的不稳定大气层结中, 强对流天气发生需要较长的能量积累时间, 但强对流爆发后能量释放迅速且时间短暂。强对流发生前上升运动较弱, 且当中层有“干侵入”时会出现较弱的下沉运动, 但在强对流爆发时上升运动瞬间突增, 强上升运动到达对流层上部, 并出现强的垂直风切变。涡度条件与垂直运动有类似的变化特点, 强对流发生前正涡度较小, 伸展高度较低, 强对流爆发

时正涡度迅速增加, 强涡度柱伸展到对流层上部。

(2) 地形敏感性试验结果对比分析发现, 因此次过程降水强度较小且局地性较强, 地形变化对过程降水量的总体分布影响不大, 而由于山脉北部气流较强, 冷空气较深厚, 因此, 地形变化对冷空气路径和南下时间的影响也不大。但地形变化对山脉南部气流的影响相对较明显, 地形降低使山脉南部急流强度有所加大, 地形升高使山脉南部急流强度有所减弱, 急流核有所南落。地形变化对动力条件的影响有些特殊, 表现在地形升高使正涡度中心强度明显增强, 但地形降低也使正涡度中心稍有增强, 这主

要与冷空气较强且不受地形影响有关。

(3)数值模拟和地形敏感性试验个例较少,更多关于强对流天气的发生机制以及地形影响机制的研究,还有待在今后的工作中不断完善。

参考文献:

- [1] Etkin D, Brun S E, A note on Canada's hail climatology: 1977-1993[J]. Int J Climatol, 1999, 19(2): 1357-1373.
- [2] Changnon S A, Changnon D, Long-term fluctuations in hail incidences in the United States [J]. J Climate, 2000, 13(3): 658-664.
- [3] Zhang Chunxi, Zhang Qinghong, Wang Yuqing. Climatology of Hail in china: 1961-2005 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008, 47(3): 795-804.
- [4] 李英, 徐银梓, 段旭. 云南一次持续性风雹过程中低空急流的若干特征[J]. 气象科学, 2000, 20(4): 503-510.
- [5] 农孟松, 祁丽燕, 黄海洪, 等. 桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J]. 气象, 2011, 37(12): 1519-1525.
- [6] 许焕斌, 田利庆. 强对流云中“穴道”的物理含义和应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 372-379.
- [7] 康凤琴, 张强, 马胜萍, 等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 749-757.
- [8] 姚胜芳, 黄治逢, 农孟松, 等. 广西冰雹气候统计分析及减灾对策[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(4): 22-25.
- [9] 钟利华, 李勇, 高安宁, 等. 广西雷击、冰雹环流特征及预报系统建设[J]. 广西气象, 2004, 25(3): 8-15.

- [10] 杨思施, 黄开刚, 刘国忠. 2013.3.23 百色市致灾冰雹天气过程成因分析 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36(2): 43-46.
- [11] 张正国, 邹光源, 刘丽君, 等. 雷达回波顶高(E T)产品在广西冰雹云识别中的应用研究[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(4): 89-92.
- [12] 吴悦, 李娇扬, 李忠党. 2016年1月钟山县一次罕见冬季冰雹天气分析 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(2): 42-46.
- [13] 韦增岸, 何飞, 邹光源, 等. 广西冰雹云闪电变化特征分析及其防雷应用 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36(4): 38-44.
- [14] 乔琪, 汤俊. 春季两次强对流天气过程多普勒雷达回波中尺度特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2011, 32(3): 42-45.
- [15] 覃艳秋, 赖雨薇, 刘蕾. 柳州夏季一次雨夹冰雹的天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 42-45.
- [16] 汪海恒, 朱永兵, 叶永恒, 等. 韶关市区一次罕见大冰雹灾害性天气过程分析[J]. 广东气象, 2013, 35(3): 12-19.
- [17] 张学泰, 李文婷, 彭窃, 等. 清远一次超级单体降雹的双偏振雷达特征分析[J]. 广东气象, 2017, 39(4): 41-51.
- [18] 王硕甫, 麦文强, 炎利军, 等. 广东一次冰雹过程中X波段双偏振雷达的特征分析 [J]. 广东气象, 2017, 39(2): 12-16.
- [19] 苏耀辉, 黄晓东. 江门地区一次冰雹过程的分析[J]. 广东气象, 2017, 39(1): 35-39.
- [20] 张曙, 董要铭. 风廓线和冰雹指数本地化调整及实例分析[J]. 广东气象, 2008, 30(5): 16-18.

(上接第32页)

- [8] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 203-218.
- [9] 李刚, 王铁, 谈言科, 等. WRF3.0 参数化敏感性及其集合预报试验 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(1): 89-96.
- [10] 黄海波, 陈春艳, 朱雯娜. WRF 模式不同云微物理参数化方案及水平分辨率对降水预报效果的影响[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 529-536.
- [11] 廖镜彪, 王雪梅, 夏北成, 等. WRF 模式中微物理和积云参数化方案的对比试验[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 461-470.
- [12] 邓明, 杨亚钦, 李江南. 城市下垫面对华南地区前汛期暴雨的影响初探 [J]. 气象研究与应用, 2017, 38(3): 23-25, 30.
- [13] 叶朗明, 陈明慧, 夏冠聪. 华南一次特大暴雨诊断分析及数值模拟[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(3): 20-26.

- [14] 何文勇, 麦雪湖, 欧坚莲, 等. 多普勒雷达资料同化对暴雨过程模拟的影响 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34(3): 61-64.
- [15] 丁瑞强, 李建平. 误差非线性的增长理论及可预报性研究[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 571-576.
- [16] 谭晓伟, 陈德辉. 观测系统影响试验与可预报性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2005.
- [17] 陈明行, 纪立人. 数值天气预报中的误差增长及大气的可预报性[J]. 气象学报, 1989, 47(2): 147-155.
- [18] 陈茂钦, 徐海明, 刘蕾, 等. WRF3. 1 微物理参数化方案对两例暴雨的集合预报试验及可预报性分析[J]. 气象科学, 2012, 32(3): 237-245.
- [19] 陈茂钦, 徐海明. 江淮锋面和华南暖区两次暴雨过程的可预报性对比[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2011, 3(2): 118-127.
- [20] 罗雨, 张立凤. 一次梅雨锋暴雨预报中的误差演变规律和可预报性分析[J]. 气象学报, 2010, 68(3): 411-420.